

# Utjecaj spona na tlačnu nosivost betonskih stupova

Jure Radnić, Alen Harapin, Radoslav Markić

## Ključne riječi

betonski stup,  
spone,  
utjecaj spona,  
tlačna nosivost,  
deformabilnost,  
ispitivanje

## Key words

concrete pier,  
ties,  
influence of ties,  
compressive strength,  
deformability,  
testing

## Mots clés

pile de béton,  
attaches,  
influence des attaches,  
résistance à la  
compression,  
déformabilité,  
essai

## Ключевые слова

бетонный столб,  
скобы,  
влияние скоб,  
несущая способность  
на давление,  
деформируемость,  
испытание

## Schlüsselworte

Betonsäule,  
Bügel,  
Einfluss der Bügel,  
Druckfestigkeit,  
Verformbarkeit,  
Untersuchung

J. Radnić, A. Harapin, R. Markić

Prethodno priopćenje

## Utjecaj spona na tlačnu nosivost betonskih stupova

Prikazani su rezultati eksperimentalnih ispitivanja utjecaja spona na tlačnu nosivost i deformabilnost centrično opterećenih betonskih stupova kvadratnoga poprečnog presjeka. Istražen je utjecaj čvrstoće betona te razmaka i ploštine spona na graničnu nosivost i deformabilnost stupova. Rezultati pokazuju da se granična nosivost i granično skraćenje ispitivanih stupova povećava s povećanjem količine poprečne armature, pri čemu je primaran utjecaj razmaka spona, a ne njihova debljina.

J. Radnić, A. Harapin, R. Markić

Preliminary note

## Influence of ties on compressive strength of concrete piers

The experimental testing of the effect of ties on the compressive strength and deformability of centrally loaded concrete piers of rectangular cross-section is presented. The authors present the way in which the ultimate bearing capacity and deformability of piers are influenced by concrete strength, and by the spacing and area of ties. The results show that the ultimate bearing capacity and the ultimate shortening of tested piers increases with the increase in the quantity of transverse reinforcement. At that, the tie spacing, rather than its thickness, is of primary significance.

J. Radnić, A. Harapin, R. Markić

Note préliminaire

## L'influence des attaches sur la résistance à la compression des piles de béton

L'essai expérimental de l'effet des attaches sur la résistance à la compression et la déformabilité des piles de béton de coupe transversale rectangulaire, soumises à la force centrique, est présenté. Les auteurs présentent de quelle manière la capacité portante limite et la déformabilité des piles sont influencées par la dureté de béton, et par l'écartement et l'espace occupé par les attaches. Les résultats montrent que la capacité portante limite et le raccourcissement limite des piles analysées augmente avec l'augmentation de la quantité de ferrailage transversal. Dans ce cas, l'écartement des attaches, et non leur épaisseur, est d'importance principale.

Џ. Раднич, Р. Маркич, А. Харарин

Предварительное сообщение

## Влияние скоб на несущую способность на давление бетонных столбов

В работе показаны результаты экспериментальных испытаний влияния скоб на несущую способность при давлении и деформируемость центрично загруженных бетонных столбов квадратного поперечного сечения. Исследовано влияние прочности бетона, а также расстояния и плоскости скоб на предельную несущую способность и деформируемость столбов. Результаты показывают, что предельная несущая способность и предельное сокращение испытываемых столбов увеличивается с повышением количества поперечной арматуры, при чём главным является влияние расстояния между скобами, а не их толщина.

J. Radnić, A. Harapin, R. Markić

Vorherige Mitteilung

## Einfluss der Bügel auf die Drucktragfähigkeit von Betonsäulen

Dargestellt sind Ergebnisse experimentaler Untersuchungen des Einflusses der Bügel auf die Drucktragfähigkeit und Verformbarkeit zentrisch belasteter Betonsäulen mit quadratischem Querschnitt. Erforscht wurde der Einfluss der Betonfestigkeit und des Abstands und der Oberfläche der Bügel auf die Grenz-Tragfähigkeit und -Verformbarkeit der Säulen. Die Ergebnisse zeigen dass sich die Grenz-Tragfähigkeit und -Verkürzung der untersuchten Säulen mit der Zunahme der Menge der Querbewehrung vergrößert, wobei der Einfluss des Abstands der Bügel primär ist und nicht deren Dicke.

Autori: Prof. dr. sc. **Jure Radnić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Alen Harapin**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Splitu, Građevinsko – arhitektonski fakultet, Matice hrvatske 15, Split; **Radoslav Markić** dipl. ing. građ., Mucić & Co d.o.o., L. Mandića 18, 21204 Dugopolje

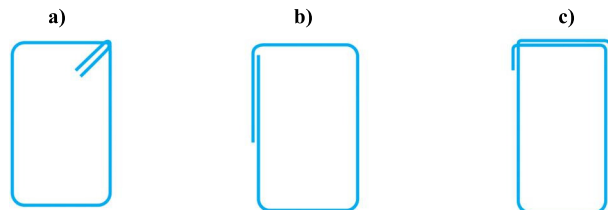
1 Uvod

Zbog djelovanja uzdužnog naprezanja, u štapnim elementima nastaje poprečna bočna deformacija. Za nearmirane betonske elemente naprezane do otprilike 95 % tlačne čvrstoće betona, odnos između slobodne poprečne deformacije i uzdužne deformacije elementa iznosi oko 0,20 (tzv. Poissonov omjer).

U armiranobetonskim stupovima koji imaju poprečnu armaturu u obliku zatvorenih spona, dolazi do poprečnoga horizontalnog potiska betona na spone zbog deformacija betona u tom smjeru. To ima za posljedicu pojavu vlakna u sponama. S druge strane, spone pružaju otpor slobodnoj poprečnoj deformaciji betona, odnosno izazivaju reaktivni bočni tlak na beton. Veličina bočnog tlaka ovisi o obliku, ploštini i razmaku spona, obliku poprečnog presjeka stupa, vrsti betona, uzdužnoj armaturi i drugim faktorima.

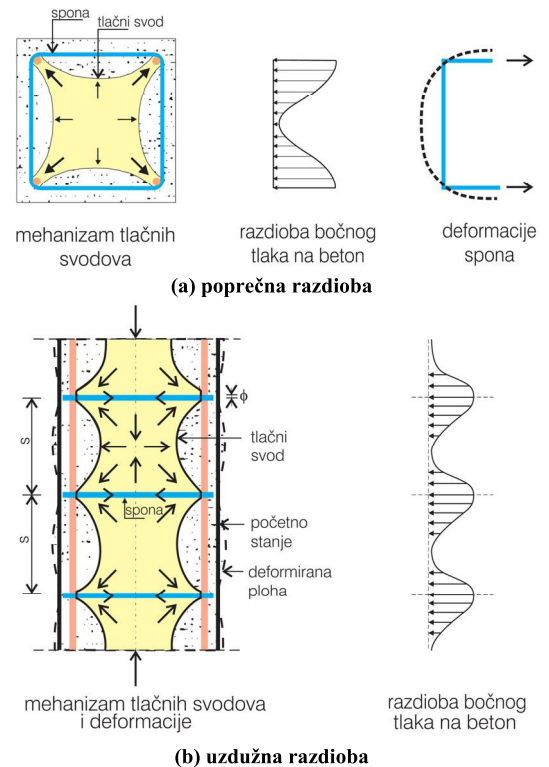
Bočni tlak na beton povećava njegovu uzdužnu tlačnu nosivost i deformabilnost (duktilnost). Ovaj se doprinos obično ne uzima u inženjerskim proračunima, osim ako spone nisu u obliku guste spirale, tj. ako se ne radi o spiralno armiranim stupovima.

Da bi spone mogle preuzeti bočni potisak betona, odnosno da bi se u njima mogla ostvariti maksimalna vlačna sila, nužno je da šipke imaju dostatan preklop. Neki najčešće primijenjeni oblici dvoreznih spona stupova pravokutnoga poprečnog presjeka prikazani su na slici 1. Još se uvijek rabe spone s kukama oblika prema slici 1. (a). Takvo rješenje nije povoljno jer spone nisu zatvorene. Takve spone mogu nositi ograničenu vrijednost vlačne sile, odnosno onoliko koliko to dopušta usidrenje kose kuke u tlačnom području betona. Povoljnije su spone prema slici 1. (b), gdje su šipke preklopljene za proračunsku duljinu preklopa. Najbolje rješenje je prema slici 1.(c), gdje su šipke preklopljene duž kraće stranice stupa i imaju kratke pravokutne kuke. Inženjerska predodžba formiranja bočnih tlakova na beton i sila u sponama kod stupova kvadratnoga poprečnog presjeka dana je na slici 2.



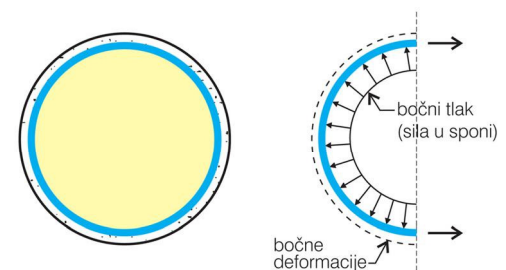
Slika 1. Neki najčešći oblici dvoreznih spona kod stupova pravokutnoga poprečnog presjeka

Stanje naprezanja i deformacija kod stupova kruznoga poprečnog presjeka znatno je homogenije (slika 3.a) nego kod stupova kvadratnoga poprečnog presjeka, dok je kod stupova složenoga poprečnog presjeka ili složenog oblika spona znatno kompleksnije (slika 3.b).

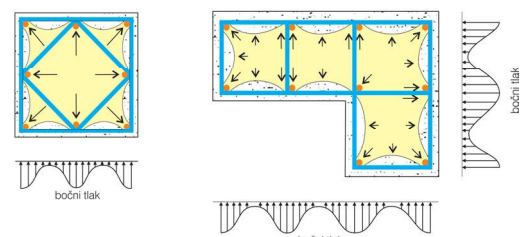


Slika 2. Inženjerska predodžba prijenosa sila i deformacija u tlačno naprezanom stupu kvadratnoga poprečnog presjeka

Izvršena su mnogobrojna ispitivanja kratkih centrično tlačno opterećenih stupova kod kojih je istraživana utjecaj poprečne armature na njihovu nosivost i duktilnost. Pri tome su ispitivani stupovi jednostavnoga i složenoga poprečnog presjeka, s uzdužnom armaturom i bez nje, s različito oblikovanim sponama i spiralnom armaturom,



(a) Stup kruznoga poprečnog presjeka



(b) Stupovi složenog poprečnog presjeka ili složenog oblika spona

s različitom količinom i razmakom poprečne armature, malih i velikih čvrstoća betona, različitih vrsta i veličina agregata i sl. Rezultati nekih takvih ispitivanja mogu se primjerice naći u lit. [1-13]. Jedan od zajedničkih osnovnih zaključaka takvih istraživanja jest da poprečna armatura pridonosi povećanju uzdužne tlačne nosivosti i duktilnosti betonskih stupova te da je njezina važnost u praktičnim konstrukcijama značajna. Pritom je povoljan što manji razmak poprečne armature i njezin što veći postotak armiranja.

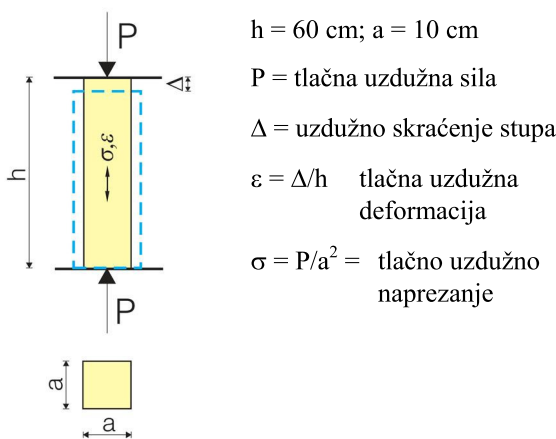
U ovom su radu prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja kratkih centrično tlačno opterećenih betonskih stupova kvadratnoga poprečnog presjeka bez uzdužne armature. Istražen je utjecaj različitih kvaliteta betona, različitih razmaka spona i različitih ploština presjeka (profila) spona na nosivost i deformabilnost ispitanih elemenata. Pri tome su za svako pojedinačno stanje izrađena i ispitana po tri istovjetna uzorka, a prikazani rezultati predstavljaju srednju vrijednost izmjerenih veličina. Opis provedenih ispitivanja, prikaz dobivenih rezultata i zaključci provedenih istraživanja dani su u nastavku.

Svrha je provedenih istraživanja dvojaka:

1. Potvrda postojećih spoznaja i eventualno stjecanje novih spoznaja o utjecaju spona na tlačnu nosivost i deformabilnost betonskih stupova.
2. Provjera razvijenog numeričkog modela za statičku, dinamičku i vremenski ovisnu analizu betonskih štapnih konstrukcija, koji uključuje utjecaj spona na tlačnu nosivost i deformabilnost stupova (predmet zasebnog rada).

## 2 Osnovni podaci o ispitanim elementima

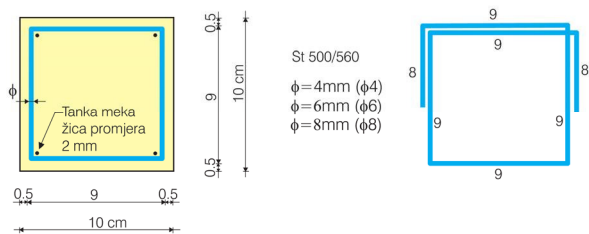
Ispitani su betonski stupovi visine  $h = 60$  cm, kvadratnoga poprečnog presjeka  $10 \times 10$  cm (slika 4.). Stupovi su opterećivani centričnom tlačnom silom  $P$ , postupno do sloma. Mjereno je uzdužno skraćenje stupa  $\Delta$  u ovisnosti o sili  $P$ . Prirast sile u području linearnog ponašanja



Slika 4. Ispitani betonski stupovi

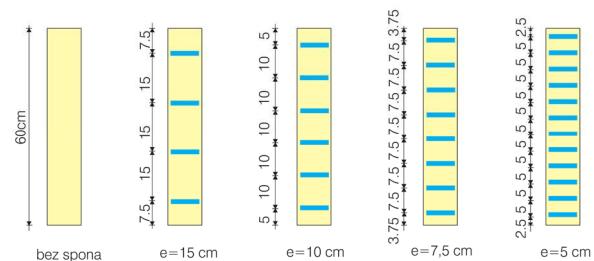
bio je 25 kN, a nakon popuštanja betona je smanjivan. Praćeno je stanje samo do dostizanja granične nosivosti stupa. Područje tzv. "omekšanja" nakon dostizanja čvrstoće betona nije praćeno jer to nije dopuštala raspoloživa mjerna oprema. Iz izmjerenog pomaka  $\Delta$ , izračunani su uzdužna deformacija  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = \Delta/h$ ) i uzdužno naprezanje betona  $\sigma$  ( $\sigma = P/a^2$ ). Za sve ispitane uzorke prikazani su dijagrami  $P - \Delta$  i  $\sigma - \varepsilon$  u ovisnosti o kvaliteti betona te razmaku i promjeru spona.

Spone su izrađene od glatkog čelika St 500/560. Detalji spona prikazani su na slici 5. Predviđeni razmak spona osiguran je njihovim vezivanjem paljenom žicom za četiri meke uzdužne žice promjera 2 mm. Istražen je utjecaj triju različitih promjera spona:  $\phi = 4$  mm ( $\phi 4$ ),  $\phi = 6$  mm ( $\phi 6$ ) i  $\phi = 8$  mm ( $\phi 8$ ).



Slika 5. Detalji spona

Razmatrani su razmaci spona ( $e$ ) prema slici 6. Naime, ispitivani su elementi bez spona i elementi s razmacima spona:  $e = 15$  cm,  $e = 10$  cm,  $e = 7,5$  cm i  $e = 5$  cm.



Slika 6. Razmatrani razmaci spona

Razmatrane su tri različite čvrstoće betona, i to: relativno mala ( $f_c = 24,9$  MPa), relativno srednja ( $f_c = 35,2$  MPa) i relativno velika ( $f_c = 45,1$  MPa). Pri tome  $f_c$  označuje jednoosnu tlačnu čvrstoću betonske prizme  $10 \times 10 \times 25$  cm utvrđenu na dan ispitivanja stupova. Projektirani su betoni izrađeni s agregatom od zdravog vapnenca najvećeg promjera zrna  $\phi_{ag} = 8$  mm i uobičajenog portlandskog cementa s odgovarajućim dodacima (superplastifikatori). Vodocementni je omjer za pojedine mješavine bio od 0,42 do 0,55, a volumenska masa betona na dan ispitivanja bila je od  $2350 \text{ kg/m}^3$  do  $2420 \text{ kg/m}^3$ . Razmatrani su slučajevi prikazani u tablici 1. Dakle, istraženo je ukupno 39 različitih slučajeva (s odgovarajućom kvalitetom betona te razmakom i promjerom spona), odnosno izrađeno je i ispitano ukupno  $3 \times 39 = 117$  stupova.

Tablica 1. Razmatrani slučajevi

Jednoosna tlačna čvrstoća betona $f_c$ (MPa)	Razmak spona $e$ (cm)	Promjer spona $\phi$ (mm)
24,9	Bez spona	4
35,2	15	6
45,1	10	8
	7,5	
	5	

Iz prethodno navedenog slijedi da ispitani stupovi imaju sljedeće odnose razmaka spona ( $e$ ) i širine stranice stupa ( $a$ ):  $e/a = \infty; 1,5; 1; 0,75$  i  $0,50$ . Kako je najveće zrno agregata  $\phi_{ag}=8$  mm, omjeri usvojenih razmaka spona  $e$  i  $\phi_{ag}$  iznose:

$$e/\phi_{ag} = \infty; 18,75; 12,5; 9,38 \text{ i } 6,25.$$

Ako se sa  $A_c$  označi ploština poprečnog presjeka stupa ( $A_c = a^2$ ) i sa  $A_s$  ploština poprečnog presjeka svih poprečnih spona po jedinici duljine stupa ( $A_s = 0,25 \pi \phi^2/e$ ), postotak armiranja poprečnom armaturom  $\mu_s$  ( $\mu_s = 100A_s/A_c$ ) prikazan je u tablici 2. Kao što se vidi, on se kreće u širokom rasponu: 0 – 10 %. Usputno, za stupove u praksi  $\mu_s$  se obično kreće oko 0,3-3 %. Uzorci s velikim postotkom poprečne armature razmatrani su s namjerom da se usputno još jednom potvrdi i istakne veliko povećanje nosivosti i duktilnosti betonskih stupova kod kojih su znatno ograničene poprečne deformacije, što je osobito

Tablica 2. Postoci armiranja ispitanih stupova sponama ( $\mu_s$ )

Razmak spona $e$ (cm)	Promjer spona $\phi$ (mm)	Površina spona $A_s = \frac{\phi^2 \pi}{4} \cdot \frac{100}{e} \text{ cm}^2$	Površina stupa $A_c$ (cm <sup>2</sup> )	Postotak armiranja sponama $\mu_s = (A_s/A_c) 100$ (%)
$\infty$	-	0	100	0
15	4	0,84	100	0,84
	6	1,88	100	1,88
	8	3,35	100	3,35
10	4	1,26	100	1,26
	6	2,82	100	2,82
	8	5,02	100	5,02
7,5	4	1,68	100	1,68
	6	3,77	100	3,77
	8	6,70	100	6,70
5	4	2,51	100	2,51
	6	5,65	100	5,65
	8	10,00	100	10,00

izraženo kod betonskih stupova s plaštom od čeličnog lima (beton u čeličnoj cijevi) ili betonskih stupova obavijenih ugljičnim trakovima. Treba istaknuti da je u provedenom eksperimentu najveće zrno agregata  $\phi_{ag}=8$  mm i da najmanji omjer  $e/\phi_{ag}$  iznosi 6,25. Kod praktičnih stupova od uobičajenih betona ( $\phi_{ag}=32$  mm)  $e/\phi_{ag}$  se spušta

do približno 3,0, a kod spiralno armiranih stupova i do oko 2,0. Uz isti se razmak poprečne armature nosivost i deformabilnost stupova povećavaju s povećanjem najmanjeg zrna agregata  $\phi_{ag}$ .

### 3 Prikaz dobivenih rezultata

Izmjerene vrijednosti veze sila-skraćenje ( $P - \Delta$ ) za stupove od betona  $f_c = 24,9$  MPa prikazane su na slici 7., za stupove od betona  $f_c = 35,2$  MPa na slici 8. i za stupove od betona  $f_c = 45,1$  MPa na slici 9. Sve tri slike pokazuju slična obilježja:

- Granična nosivost i granično skraćenje stupa znatno se povećavaju s količinom poprečne armature, odnosno prije svega sa smanjenjem razmaka spona ( $e$ ) i potom s povećanjem poprečnog presjeka spona ( $\phi$ ).
- Uz istu površinu poprečne armature ( $A_s = 0,25 \pi \phi^2/e$ ), veću nosivost i veće granično skraćenje imaju stupovi s manjim razmakom spona ( $e$ ). U mnogim je slučajevima postignuta veća granična nosivost i veće granično skraćenje stupa za znatno manju ukupnu površinu poprečne armature ( $A_s$ ) za koju je bio manji razmak spona  $e$ . Primjerice: spona  $\phi 4$  mm na razmaku  $e = 5$  cm ( $A_s = 2,51 \text{ cm}^2/\text{m}$ ) povoljnije su (omogućuju veću nosivost i veću duktilnost stupa) od spona  $\phi 8$  mm na razmaku  $e = 7,5$  cm ( $A_s = 6,70 \text{ cm}^2/\text{m}$ ), ili spona  $\phi 4$  mm na razmaku  $e=7,5$  cm ( $A_s = 1,68 \text{ cm}^2/\text{m}$ ) povoljnije su od spona  $\phi 8$  mm na razmaku  $e=10$  cm ( $A_s=5,02 \text{ cm}^2/\text{m}$ ), ili spona  $\phi 4$  mm na razmaku  $e = 10$  cm ( $A_s = 1,26 \text{ cm}^2/\text{m}$ ) povoljnije su od spona  $\phi 8$  mm na razmaku  $e = 15$  cm ( $A_s = 3,35 \text{ cm}^2/\text{m}$ ) i sl. Potvrđeno je da je razmak spona  $e$  ključan za graničnu nosivost i skraćenje stupa.
- Povećanje granične nosivosti stupa sa sponama  $\phi 8$  mm na razmaku  $e = 5$  cm u odnosu na stup bez spona iznosilo je oko 80% za sve tri čvrstoće betona. Odnosno, omjer nosivosti stupa koji ima poprečnu armaturu i istog takvog stupa bez spona gotovo da ne ovisi o čvrstoći betona. Primjerice, za spona  $\phi 4$  mm na razmaku  $e = 10$  cm, čemu odgovara  $\mu_s = 1,26$  % i  $e/\phi_{ag} = 6,25$ , povećanje granične tlačne nosivosti za sve betone iznosi otprilike 22%. Ovo bi stanje približno odgovaralo u praksi primjerice stupu 20/20 cm

armiranom  $\phi 10/15$  cm ( $\mu_s = 1,30$  %,  $e/\phi_{ag} = 4,70$ ). Odnosno, za slučajeve uobičajenih spona u praksi značajan je njihov doprinos na graničnu tlačnu nosivost stupova. Ovaj se doprinos redovito ne uzima u izračun nosivosti stupa.

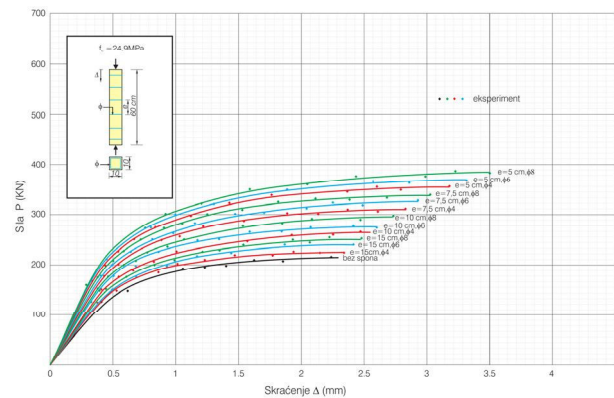
- Povećanje skraćanja stupa pri dostizanju granične nosivosti za slučaj sa sponama  $\phi 8$  mm na razmaku  $e = 5$  cm, u odnosu prema stupu bez spona, iznosilo je oko 60% za sve tri razmatrane čvrstoće betona. Odnosno, omjer skraćanja stupa koji ima poprečnu armaturu i istog takvog stupa bez spona vrlo malo ovisi o čvrstoći betona.
- Stupovi od betona većih čvrstoća imaju veću graničnu nosivost i manje skraćanje (duktilnost) od stupova od betona manjih čvrstoća. Odnosi odgovarajućih čvrstoća i duktilnosti praktično ne ovise o poprečnoj armaturi.
- Za stupove bez spona, elastično je ponašanje do oko  $0,35f_c$  za  $f_c = 24,9$  MPa, do otprilike  $0,50 f_c$  za  $f_c = 35,2$  MPa i do oko  $0,60f_c$  za  $f_c = 45,1$  MPa. S povećanjem površine spona, proširuje se područje elastičnog ponašanja. Tako se primjerice za  $e = 5$  cm i  $\phi = 8$  mm ono proširuje na približno  $0,45f_c$  za  $f_c = 24,9$  MPa, na približno  $0,55f_c$  za  $f_c = 35,2$  MPa i na oko  $0,65f_c$  za  $f_c = 45,1$  MPa.

Na slikama 10.-12. prikazani su dijagrami naprezanje-deformacija ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) razmatranih stupova, pri čemu su  $\sigma$  i  $\epsilon$  izračunati iz izmjerenih veličina  $P$  i  $\Delta$  ( $\sigma = P/a^2$ ,  $\epsilon = \Delta/h$ ). Ti su dijagrami afini dijagramima  $P - \Delta$  i također svjedoče o prethodno navedenim zaključcima. Kao što se vidi, deformacije pri dostizanju granične čvrstoće nearmiranih stupova iznose: za  $f_c = 24,9$  MPa oko 3,7 ‰, za  $f_c = 35,2$  MPa oko 3,2 ‰ i za  $f_c = 45,1$  MPa oko 2,7 ‰. Stvarne lomne deformacije bile su još veće, ali ih s raspoloživom opremom nije bilo moguće pratiti nakon dostizanja maksimalne nosivosti. Očito je da spona znatno povećavaju duktilnost betona.

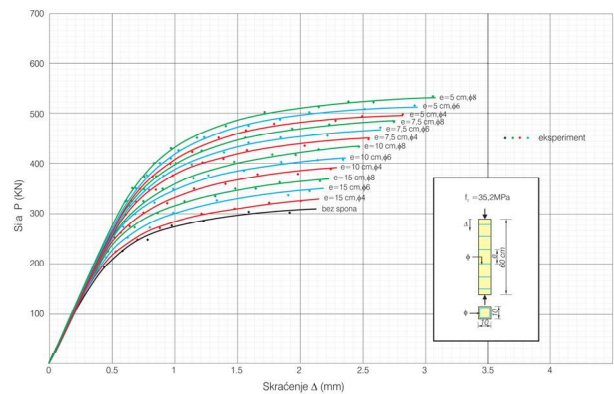
Može se uočiti da stupovi bez spona imaju nešto manja lomna naprezanja od računskih čvrstoća  $f_c$  koje su utvrđene na prizmi dimenzija 10/10/25 cm i koja je držana u istim uvjetima kao i stupovi. Vidljivo je da lomna naprezanja stupova bez spona iznose otprilike:  $\sigma = 21,5$  MPa za  $f_c = 24,9$  MPa,  $\sigma = 30,0$  MPa za  $f_c = 35,2$  MPa i  $\sigma = 38,0$  MPa za  $f_c = 45,1$  MPa. Ovo smanjenje čvrstoće u odnosu na  $f_c$  posljedica je veće visine i veće vitkosti stupa u odnosu prema prizmi visine 25 cm.

U odnosu na stupove bez spona, stupovi armirani sponama  $\phi 8$  mm na razmaku  $e = 5$  cm imaju povećanje čvrstoće približno 80% za sve betone. Tako armirani stupovi od betona  $f_c = 24,9$  MPa imaju čvrstoću  $\sigma = 37,5$  MPa,

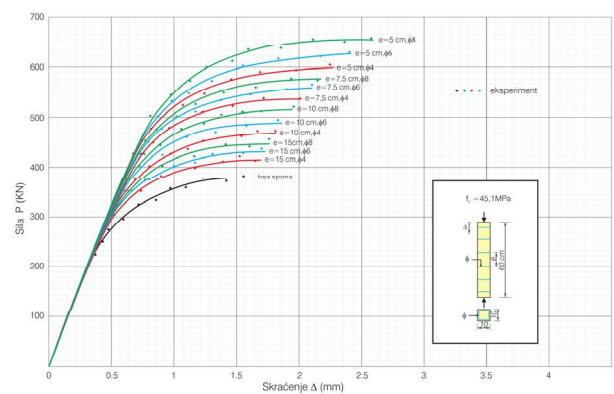
stupovi od betona  $f_c = 35,2$  MPa čvrstoću  $\sigma = 52,5$  MPa i stupovi od betona  $f_c = 45,1$  MPa čvrstoću  $\sigma = 66$  MPa.



Slika 7. Vezu sila (P) – skraćenje (Δ) kod stupova od betona  $f_c=24,9$  MPa



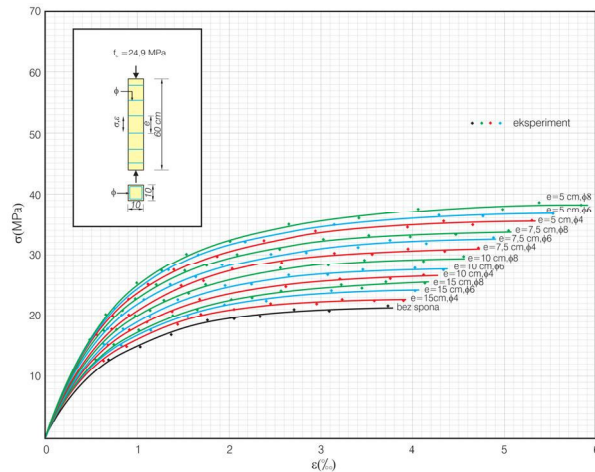
Slika 8. Vezu sila (P) – skraćenje (Δ) kod stupova od betona  $f_c=35,2$  MPa



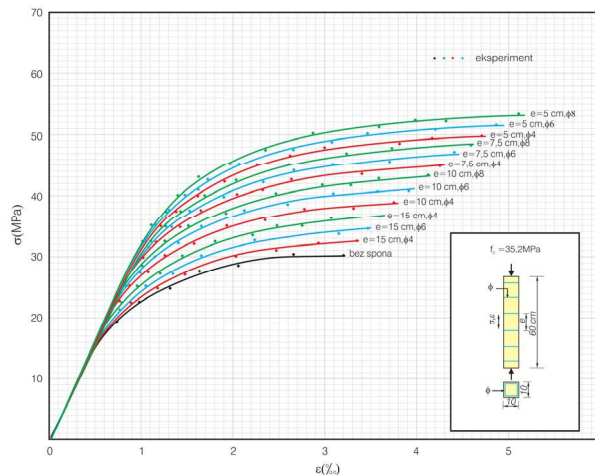
Slika 9. Vezu sila (P) – skraćenje (Δ) kod stupova od betona  $f_c=45,1$  MPa

Početni su moduli elastičnosti betona stupova koji imaju spona i onih bez spona praktično jednaki. Početni modul elastičnosti stupova od betona  $f_c = 24,9$  MPa iznosi oko 32,2 GPa, od betona  $f_c = 35,2$  MPa otprilike 34,6 GPa i od betona  $f_c = 45,1$  MPa oko 37,1 GPa. Tangentni se modul elastičnosti ovijenog betona povećava s povećanjem površine spona (ponajprije sa smanjenjem razmaka spona, a potom s povećanjem njihova promjera). Dakle, s

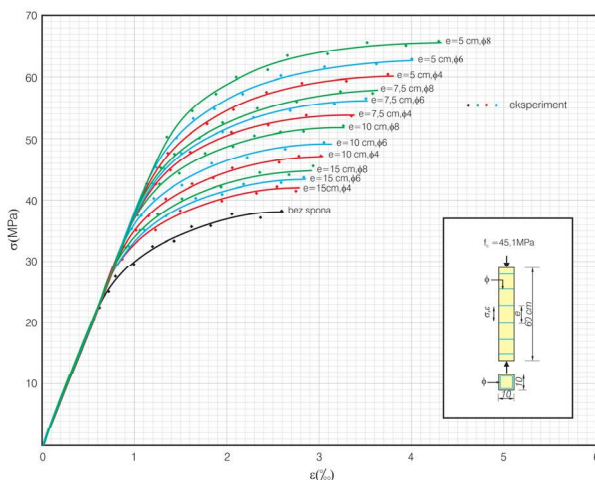
povećanjem količine spona povećava se i krutost elementa. S druge strane, s povećanjem količine spona povećava se ukupno skraćenje elementa, tj. njegova duktilnost.



Slika 10. Veza naprezanje ( $\sigma$ ) – deformacija ( $\epsilon$ ) kod stupova od betona  $f_c=24,9$  MPa



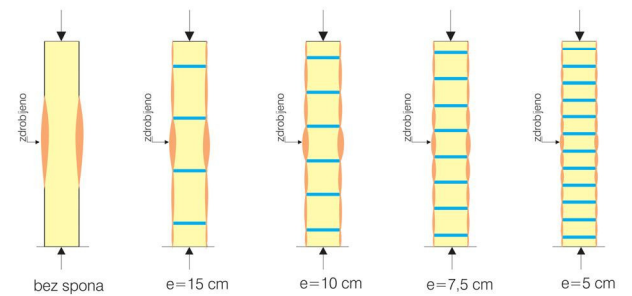
Slika 11. Veza naprezanje ( $\sigma$ ) – deformacija ( $\epsilon$ ) kod stupova od betona  $f_c=35,2$  MPa



Slika 12. Veza naprezanje ( $\sigma$ ) – deformacija ( $\epsilon$ ) kod stupova od betona  $f_c=45,1$  MPa

Slom svih stupova nastao je drobljenjem betona po sredini njihove visine, uvijek između dviju susjednih spona. Niti jedna spona nije bila prekinuta niti je bila jače deformirana. Pojava sloma po sredini visine stupa posljedica je najvećeg utjecaja vitkosti elementa u tom području. Slom je iniciran oko polovine razmaka spona jer je na tom mjestu najveća slobodna poprečna deformacija betona.

Karakteristični mehanizmi sloma stupova ovisili su o razmaku spona i prikazani su shematski na slici 13. Tipična područja sloma stupova prikazana su na slici 14.



Slika 13. Karakteristični mehanizmi sloma stupova (područja drobljenja betona)



Slika 14. Fotografija tipičnog područja sloma stupa

#### 4 Zaključak

Provedena istraživanja potvrđuju i upotpunjuju dosadašnje spoznaje o utjecaju spona na nosivost i duktilnost betonskih stupova. Granična nosivost i granično skraćenje ispitanih stupova povećavaju se s količinom poprečne armature. Pri tome je primarniji utjecaj razmaka spona od površine njihova presjeka. Uz istu površinu poprečne armature po jedinici duljine stupa, veću nosivost i veću duktilnost imaju stupovi s manjim razmakom spona. U odnosu na stupove bez spona, ispitani stupovi s najvećom poprečnom armaturom imali su veću nosivost za oko 80% i veću duktilnost za oko 60% (navedena se duktilnost odnosi na stanje pri dostizanju granične nosivosti, a ne pri stvarnom slomu). Odnosi nosivosti i

deformabilnosti stupova sa sponama, u odnosu na iste bez spona, praktično ne ovise o čvrstoći betona. Stupovi od betona većih čvrstoća imaju veću tlačnu nosivost i manju duktilnost nego stupovi od betona manjih čvrstoća. Preporučuje se u praksi koristiti se što manjim razmacima spona za isti postotak armiranja poprečnom armaturom. Naime, povoljnije su spone manjeg promje-

ra na manjem razmaku od spona većeg promjera na većem razmaku. Progušćenje spona je povoljno sa stajališta povećanja tlačne nosivosti betona, smanjenja duljine izvijanja uzdužnih tlačnih šipki armature te povećanja nosivosti stupa na posmik. Sve spone trebaju imati dostatno preklopljene šipke, kako bi mogle preuzeti maksimalnu vlačnu silu.

#### LITERATURA

- [1] Martinez S., Nilsen A. H., Slate F.: *Spirally reinforced, high-strength concrete columns*, Journal proceedings, Vol. 81, No. 5, 1994., str. 431.-442.
- [2] Pessiki S., Peroni A.: *Axial load behavior of large scale spirally reinforced high strength concrete columns*, ACI Structural journal, Vol. 94, No. 3, 1997., str. 304.-314.
- [3] Bing L., Park R., Tanaka H.: *Stress-strain behavior of high-strength concrete confined by ultra-high and normal-strength transverse reinforcements*, ACI Structural journal, Vol. 98, No. 3, 2001., str. 395.-406.
- [4] Němeček J., Padevêt P., Patzák B., Bittnar Z.: *Effect of transversal reinforcement in normal and high strength concrete columns*, Materials and Structures, Vol. 38, No. 7, 2005., str. 665.-671.
- [5] Park R., Priestley M. N. J., Gill W. D.: *Ductility of square-confined concrete columns*, Journal of Structural Division, Vol. 108, No. 4, 1982., str. 929.-950.
- [6] Yong Y. K., Nour M. G., Nawy E. G.: *Behavior of laterally confined high-strength concrete under axial loading*, Journal of Structural Division, Vol. 114, No. 2, 1988., str. 332.-351.
- [7] Karim M., El-Dash: *Effect of aggregate on the performance of confined concrete*, Cement and concrete research, Vol. 36, No. 3, 2006., str. 599.-605.
- [8] Liu J., Foster S. J., Attard M. M.: *Strength of tied high-strength concrete columns loaded in concentric compression*, ACI Structural journal, Vol. 97, No. 1, 2000., str.149.-156.
- [9] Sargin M., Gosh S. K., Handa V. K.: *Effect of lateral reinforcement upon the strength and deformation properties of concrete*, Magazin of concrete research, Vol. 23, No. 75-76, 1971., str. 99.-110.
- [10] Razvi S. R., Saatcioglu M.: *Circular high-strength concrete columns under concentric compression*, ACI Structural journal, Vol. 96, No. 5, 1999., str.817.-826.
- [11] Saatcioglu M., Razvi S. R.: *Strength and ductility of confined concrete*, Journal of Structural engineering, Vol. 124, No. 12, 1998., str.1731.-1437.
- [12] Chung H. S., Yang K. H., Lee Y. H., Eun H. C.: *Strength and ductility of laterally confined concrete columns*, Canad J. Civil engineering, Vol. 29, 2002., str. 820.-830.
- [13] Tan T. H., Yip W. K.: *Behavior of axially loaded concrete columns confined by elliptical hoops*, ACI Structural journal, Vol. 96, No. 6, 1999., str. 967.-971.